

# CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF COHERENT LIGHT SOURCE EXPERIMENTAL STATION AT UVSOR

Sei-ichi Tanaka<sup>#,A)</sup>, Masahiro Adachi<sup>A)</sup>, Jun-ichiro Yamazaki<sup>A)</sup>, Kenji Hayashi<sup>A)</sup>, Shin-ichi Kimura<sup>A)</sup>, Eiken Nakamura<sup>A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A)</sup>, Masahito Hosaka<sup>B)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>B)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B)</sup>, Toshiharu Takahashi<sup>C)</sup>, Heishun Zen<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> UVSOR, Institute for Molecular Science  
Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585

<sup>B)</sup> Graduate School of Engineering, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

<sup>C)</sup> KURRI, Kyoto University  
Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka, 590-0494

<sup>D)</sup> IAE, Kyoto University  
Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011

## Abstract

At UVSOR, coherent light source technologies, such as resonator free electron laser, coherent harmonic generation and coherent synchrotron radiation via laser modulation, had been developed by parasitically using an undulator and a beam-line normally used for photo-electron spectroscopy. Under Quantum Beam Technology Program of MEXT in Japan, we started constructing a new experiment station dedicated for the coherent light source developments. We created a new straight section by moving the injection line. Two identical undulators 1m long were constructed and installed there. A buncher magnet was constructed and installed between the undulators to form an optical klystron. Two beam-lines, BL1U and BL1B, were constructed, the former of which is for free electron laser and coherent harmonic generation and the later for the coherent synchrotron radiation in the terahertz range. The laser system was reinforced and new laser transport line was constructed. The generation test of coherent synchrotron radiation by laser modulation was successful.

## UVSOR におけるコヒーレント光源実験ステーションの建設と立上

### 1. はじめに

UVSOR における光源開発研究は放射光利用実験ステーション(光電子分光)の可変偏光アンジュレーターおよびビームラインの一部を流用する形で行われていた。この環境下において自由電子レーザー、コヒーレントテラヘルツ放射光、コヒーレント高調波発生、レーザーコンプトン散乱など数多くの成果を得ることができた<sup>[1-8])</sup>。これらの成果により 2008 年度からの 5 年間、文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラムに採択され、新しい専用実験ステーションの建設と実用化を目指した開発研究に取り組んでいる。

2010 年には、ビーム入射路と主加速空洞の移設によって光源開発専用の直線部を創出した。2011 年には光クライストロン型アンジュレーターの建設と設置、また、2009 年から 2010 年の間にはレーザーシステムの増強と移設など実施した。一方で 2011 年には実用化を視野に入れ専用のビームラインの建設も行われ、2012 年には試験的なコヒーレント光の発生

にも成功した。

本報告では UVSOR におけるコヒーレント光源実験ステーションの建設と立上の状況について述べる。

### 2. コヒーレント光源実験ステーションの建設

コヒーレント光源開発専用の実験ステーションは大まかに、光クライストロン型アンジュレーター部、レーザーシステム部、THz/CSR および VUV/CHG・FEL ビームライン部の 3 つからなる。本節ではそれぞれの概要について個別に説明する。

#### 2.1 光クライストロン型アンジュレーターの建設

2009 年度末から 2010 年春にかけて、ビーム輸送路終端部に偏向電磁石 3 台と四極電磁石 3 台を追加し延長することでストレージリング入射点を移設する改造を行った。その結果、それまで入射点として利用していた 4 m の直線部を新たに光源開発専用として利用することが可能になった<sup>[9])</sup>。この直線部に 2 台のアンジュレーターとバンチャー電磁石で構成される光クライストロンの設置を行った。従来はモ

<sup>#</sup> stanaka@ims.ac.jp

ジェネレーターとラジエーター、バンチャー部が一体型となっている光クライストロンを利用していた。新たに設置された光クライストロンは図1に示すように右からモジュレーターU1A、バンチャー電磁石、ラジエーターU1Bとなっており、分離した構造をとっている。2つのアンジュレーターは可変偏光型で、磁気回路構成はApple-II型、ポール長1 m、最少ギャップ24 mm、周期長84 mmの同型のものを使用している。これらは磁極端部間距離にして45 cmの間隔をもって配置され、両者の中心にあるバンチャー電磁石は全長442 mm、全高641 mmでR56値は最大で67  $\mu\text{m}$ の性能を有している。このアンジュレーターはUVSORを600 MeVで運転した場合には800 nm、750 MeVで運転した場合には400 nmの基本波を生成可能であり、後述するTi:Sレーザーの基本波及び2倍波と同調可能である<sup>[10]</sup>。

## 2.2 シードレーザーシステムの更新と移設

新しいコヒーレント光源開発ステーションは従来の実験場所とはリングを挟んでおよそ反対側に位置する。これに伴いシードレーザーシステム全体の移設が2010年から行われた。また、より高出力のコヒーレント光源開発を実現するためにCOHERENT社製のマルチパス増幅器(Hidra-50)と高繰り返しシングルパス増幅器(Legend-cryo)が導入され、現在ではCSR・CHG双方の光源開発において高パルスエネルギーのシードレーザーを利用できる環境にある。これら一連のレーザーシステムは更新による排熱の増大や安定性を考慮し、空調と温度管理された専用レーザーハッチの内部に設置された。2011年には全長約20 mにも及ぶシードレーザー輸送路が建設された。図2にレーザーシステム、およびその輸送路の全体の概略図を示す。上が移設前、下が移設後、赤枠で囲んだ領域がレーザーシステムの設置されているレーザーハッチ、赤線がレーザー輸送の光路となる。リング内の既設の放射光実験ステーションとの干渉を避けるためにレーザーステーションからのシードレーザー光は、アンジュレーター下流側のレーザーハッチからいったん上流側へ輸送されたのち、アンジュレーター内へ入射される。そのため光路長は従来の5 mから20 mへと大幅な延長を余儀なくされた。この上流へと向かう経路は、放射線遮



図1:光クライストロン型アンジュレーター

蔽壁上を通過する。遮蔽壁上は内側にある電磁石や加速空洞からの放熱、外側の空調設備から生じる大気の揺らぎが大きく、これは輸送路末端での強度分布やポインティングの不安定化、極短パルスレーザー光の大気中での自己収束現象に直結する。これらを抑制するために、遮蔽壁上の輸送路を全て内径40 mmのアルミ配管で覆った。さらに、配管の両端に厚さ5 mmの石英ガラスでできたブリュースター窓を設けて内部をスクロールポンプによって数〜数十Pa程度の真空にした。一方でレーザーハッチ内部の光路についても、再生増幅器射出部から約2 mの地点に $f = 25 \text{ mm}$ と $f = -75 \text{ mm}$ の2枚の1 inch レンズを追加することで、スポットサイズを直径5 mmから10 mmに拡大した平行光で輸送できるように調整を加えている。拡大平行光とした理由は通常の小さなスポットサイズのまま輸送した場合、自己集束効果が強まり、輸送路に用いている光学系に大きな損傷を与える恐れが生じるためである。また、長距離を極短パルスのまま輸送する必要がないように、遮蔽壁上のアルミ配管終端に新たに光学台を追加し、そこにパルスコンプレッサーを設置した。このパルスコンプレッサー入射前にスポットサイズはレンズによって5 mmに戻される。この輸送システムはよりパルスエネルギーの大きいHidra-50やLegend-cryoに対しても使用可能であり、各種コヒーレント光源開発に適切な強度、繰り返しパルス、パルス幅のシードレーザー光を安定した状態で得ることができる。

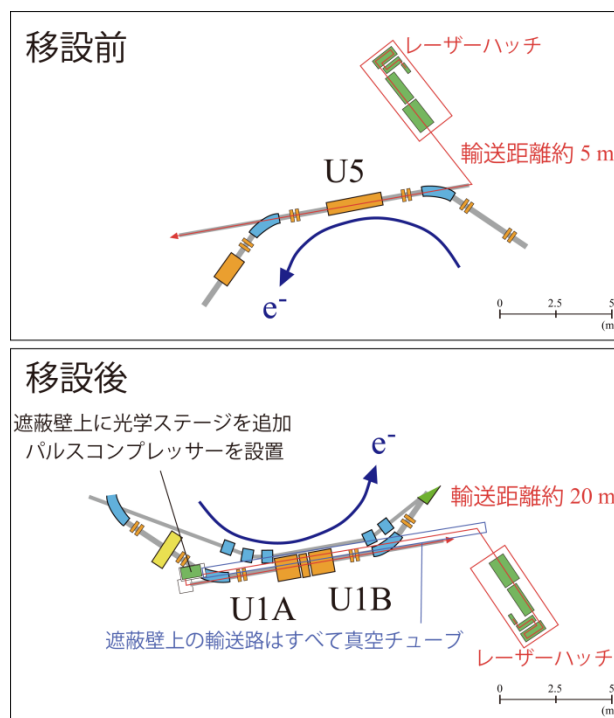


図2:シードレーザー輸送の概略  
上 移設前 下 移設後

### 2.3 THz/CSR、VUV/CHG 実験用新規ビームライン

図 3 に新たに設置された THz/CSR(0.5~2.0 THz) および VUV/CHG(~9 eV)光源開発用ビームラインの概略図を示す。アンジュレーター直後の下流偏向電磁石 B1 中で放出される高強度、高周波のテラヘルツコヒーレント放射光が、偏向磁石ダクト内部に設置されたマジックミラーにより集光され取り出される。一方光クライストロンから放出される高調波光はアンジュレーターの延長線に取り出される。図中偏向電磁石 B1 から伸びている赤と青の破線で囲んだ部分がそれぞれ THz/CSR 用の BL1B および VUV/CHG 用の BL1U ビームラインである。BL1U は将来FEL用ミラーの導入によって光共振器の一部として機能することが可能な設計となっている。BL1B ではまずマジックミラーM0 によって偏光電磁石 B1 からの放射光を取り込み、M1 へと集光されながら導かれる。次に隔絶窓を通じてリング外部に取り出され、M2 へと向かう。その後、M3、マイケルソン干渉計、M5 と順に経て射出される。なお使用しているマジックミラーはより広範囲の放射光を取り込めるよう新たに設計、作成されたもので  $244 \times 80 \text{ mrad}^2$ 、取り込み範囲で 540 mm の性能を有している。その他の各種ミラーは M1、M5 は  $45^\circ$  トロイダルミラー、M3 と M5 は平面ミラーとなる。また図中には混乱を避けるため示していないが、M4 は M3 とマイケルソン干渉計の間に設置されており、空間的な上下動作によって導入および解除可能な平面ミラーである。M4 は干渉計を通さずに放射光を直接観測したい場合に利用され、状態確認などに用いられる。

## 3. コヒーレント光実験ステーションの立上状況

### 3.1 THz/CSR 光の観測

現在、立上の完了した部分から順次コヒーレント光源開発実験に利用している。図 4 には新規実験ステーションにおいて、立上直後に観測されたバンチスライス法により生成されたテラヘルツ CSR の波

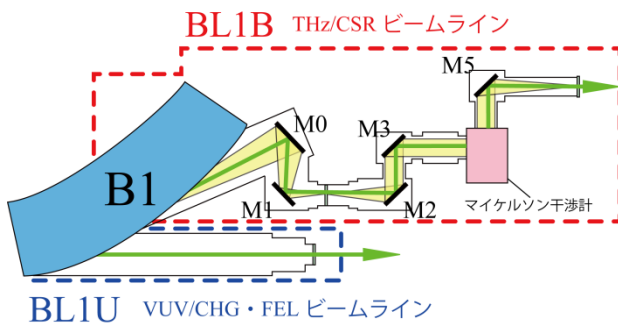


図 3:新規ビームライン

赤 THz/CSR (BL1B)

青 VUV/CHG・FEL (BL1U)

形データを示す。条件は U1A ギャップ 25.25 mm、U1B 200 mm、750 MeV、ビームカレントはシングルバンチ 1 mA となっている。観測には QMC インストルメンツ社製のアンチモン化インジウムホットエレクトロンボロメーター(検出波長  $2 \sim 50 \text{ cm}^{-1}$ )を使用している。各種バンドパスフィルターを用いた検出とマイケルソン干渉計の観測結果から  $10 \text{ cm}^{-1}$  前後の THz 光が得られていることも確認できている。今後は光源性能評価に引き続き利用研究開始が予定されている。

### 3.2 光クライストロン自発光の観測

図 5 に光クライストロン型アンジュレーターによる自発放射光スペクトルを示す。赤線は実測値、青破線によって示したものは Radia による磁場計算結果を用いた計算値である。また電子蓄積リングについてはシングルバンチ、エネルギー 600 MeV の状態で観測している。スペクトルの最大ピークに注目すると 800 nm 付近に観測されており、計算結果とも比較的良い一致を見せていることが分かる。

VUV/CHG 実験設備についてもレーザーシステムの節でも記述したように Hidra-50 および

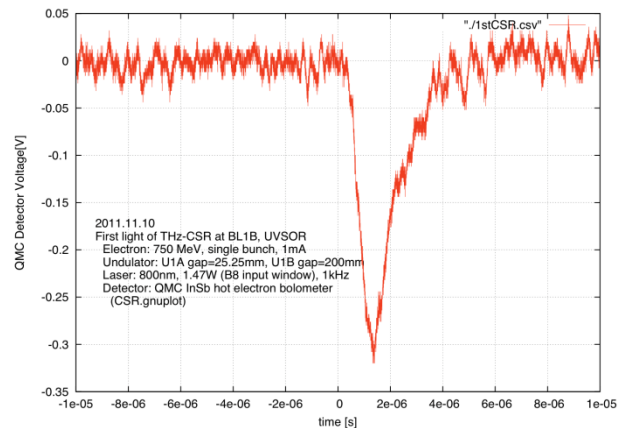


図 4:THz/CSR の観測波形

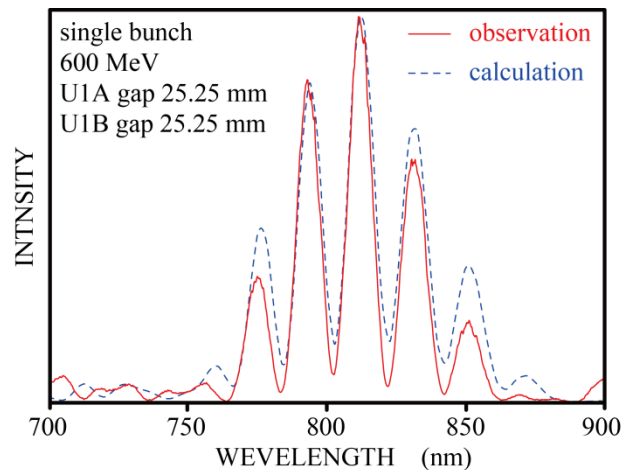


図 5:U1 の自発光スペクトル  
赤線 実測値 青破線 計算値

Legend-cryo はすでに調整が完了しており電子蓄積リングのシャットダウン作業終了をもって利用可能な状態となっている。一方でより高周波のVUV/CHG発生を可能とするためのシードレーザーの高調波化についても検討しており、SHG結晶と希ガスを利用したシステムについてそれぞれ並行して設計、調達中である。これらについても順次利用可能な環境を確保する予定である。新たな光クライストロン型アンジュレーターに合わせたFEL用の光共振器の設計もすでに終えており、本年度中にも設置する予定となっている。

#### 4. まとめ

これまでに述べてきたようにUVSORにおいて5年計画で進められてきた「量子ビーム基盤技術開発プログラム」は2012年度に最終年度を迎え、コヒーレント光源開発実験ステーションの立上もほぼ完了しTHz/CSR、VUV/CHG、FELの各種コヒーレント光源の実用化に向けた実験環境が整いつつある。今年度は、コヒーレント放射光の利用法の開拓へ向けた実験に取り組む予定である。

#### 謝辞

UVSORにおけるコヒーレント光源開発実験ステーションの建設と立上は「文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラム」のもとに行われています。また、この研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究B23360043)の助成を受けています。

#### 参考文献

- [1] M. Shimada et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No.12 (2007) pp.7939-7944
- [2] S. Bielawski et al., Nature Physics, 4 (2008) 390-393
- [3] M. Shimada et al., Phys. Rev. Lett. 103, 144802 (2009)
- [4] M. Labat et al., Euro. Phys. J. D Vol. 44, No. 1 (2007) 187-200
- [5] M. Labat et al., Phys. Rev. Lett. 101, 164803 (2008)
- [6] M. Labat et al., Phys. Rev. Lett. 102, 014801 (2009)
- [7] T. Tanikawa et al., Appl. Phys. Express 3 (2010) 122702
- [8] Y. Taira et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. A637 (2011) 5116-5119
- [9] e.g.UVSOR Activity Report 2010 (2011)
- [10] Y. Uematsu et al., in these proceedings